

# Umwelt-Technik, Umwelttechnik

Leschonski, Kurt

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 1986 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.65-85



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

5.7.1986 in Clausthal

## **Umwelt-Technik, Umwelttechnik**

Von **Kurt Leschonski**

Es ist viel darüber geschrieben worden, daß sich durch Schadstoffemissionen weitgehend zerstörte Teilbereiche der Ökosphäre kaum noch regenerieren lassen, und der Einfluß der Technik auf die Umwelt irreparable Schäden hinterläßt. Dafür lassen sich sicherlich entsprechende Beispiele finden. Ein Beispiel für Teilzerstörung und Rekultivierung läßt sich im Oberharz finden.

F. Günther [1] hat 1888 in seinem Buch „Der Harz in Geschichts-, Kultur- und Landschaftsbildern“ im Abschnitt: „Der Wald und seine Bewohner“ den damaligen Zustand des Oberharzer Waldes und den des Harzer Vorlandes beschrieben: „Die Harzer Silberhütten liegen fast alle in engen Gebirgstälern. Diesen folgt meistens der Rauch, und so nimmt man die Spuren desselben an den Berghängen der Thäler schon in weiter Entfernung war. Die Fichten zeigen ein eigenthümliches Blaugrau oder ein schmutziges Dunkelgrün, häufiger noch ein helleres Gelblichgrün. Treten wir an einen solchen Baum heran, um ihn näher zu betrachten, so finden wir neben normal grünen fahle, mißfarbige, gelbspitzige, trockenspitzige, rotpitzige und rote Nadeln. Je nach dem Grade der Beschädigung und der Nähe der Rauchquelle überwiegt die eine oder die andere Art. Je näher wir der Hütte kommen, desto mehr nimmt die Entfärbung der Nadeln von Grün in Rot zu. Da die vollständig roten Nadeln meist abfallen, so überzieht eine hohe, mit dem Humus nicht verbundene Nadelschicht den Waldboden, die Bäume werden fast kahl, die Äste und bei jüngeren Bäumen auch der Stamm dunkel bis kohlschwarz, die Äste trocken, die Krone licht, und noch ehe wir die Hütte erreichen, endet der Wald mit weit auseinander stehenden, ganz dünn benadelten Baumkrüppeln. In unmittelbarer Nähe der Hütten wächst weder Baum noch Strauch noch Grashalm. Diese Rauchblößen haben sich in dem letzten Jahrhundert bedeutend erweitert, ja zum Teil in diesem überhaupt gebildet.“ Günther, der dieser Thematik ein ganzes Kapitel seines Buches gewidmet hat, beschreibt damit eine Fichtenschädigung, über deren Verursacher nicht länger diskutiert werden mußte.

Günther beschreibt auch, „daß massenhaft Pochsand vom Wasser mitgeführt wird und sich auf den überschwemmten Ländereien des Harzvorlandes ablagert und den Boden ganz oder teilweise unfruchtbar macht“. Er schreibt: „Dieser Pochsand entsteht beim Zerkleinern der Erze und enthält ziemliche Mengen von Bleioxyd, das dem tierischen Organismus schädlich ist. Infolgedessen können auf der Innerste bis nach Hildesheim hin, 50 bis 60 km von den Hüttenwerken entfernt, keine Enten und Gänse gehalten werden. Haustiere, welche aus der Innerste öfter saufen, Hühner, welche den Innerstesand aufpicken, sterben an Bleivergiftung.“ Dieser für reine Industrieggenden seinerzeit nur mehr oder weniger lokalisiert auftretende, und wohl auch tolerierte Zustand, ließ mit zurückgehender Ausbeute der Gruben auch auf bessere Zeiten hoffen.

In seinem 1907 erschienenen Buch „Unter grünen Tannen des Oberharzes“ schrieb der Clausthaler Professor Karl Schnabel [2] in einem Zwiegespräch mit dem heiligen Florian, dem Schutzpatron der Hüttenleute: „Und doch wird die Zeit kommen, lieber Florian, wo Dir unter der grünen Tanne die Pfeife ausgeht und wo Du unter dem Gelächter der Grünröcke abziehst. Und keine Träne wird Dir beim Abschied geweint, kein Miserere ertönt. Aber ein freudiges Rauschen geht durch den Tannenwald und die Grünröcke jubeln: endlich ist die Luft rein. Und bist Du mit Deiner langen Pfeife glücklich über die Berge, flüchten aus dem Dunstkreis der Städte müde Menschen scharenweise unter die grüne Tanne und suchen Ruhe und Erquickung in der würzigen Waldluft. Kein Silberstrom quillt mehr aus den Adern des Harzgebirges heraus, aber ein Goldstrom fließt aus den Taschen ruhebedürftiger Fremdlinge in den Harz hinein. Er nimmt seinen Lauf nach den Bergstädten und fällt als Goldregen auf die Nachkommen der einstigen Berg- und Hüttenleute und auf die Forstleute, die den Erholung suchenden Menschenkindern dafür Ströme von Milch und Süßbier, von klarem Wasser und frischer Luft bieten.“

Im Jahre 1986 sind die Zukunftsvisionen Karl Schnabels erfüllt, auch wenn wir wieder vom Waldsterben sprechen. Im Prinzip ist die Luft im Harz wieder rein, und die Rekultivierung des Oberharzes läßt, bis auf einige von Steinesuchern offengehaltene Halden, die einstige Industrielandschaft mit ihren Rauchblößen usw. nicht mehr erkennen.

Ein Hoffnungsschimmer trotz der heute wieder zunehmenden Schäden an den Fichten des Oberharzes? Nun, wer die Untersuchungen von J. V. Schröder und C. Reuß aus dem Jahre 1882 [3] verfolgt, wonach in der Resistenzreihe der Harzbäume die heute vorherrschende Fichte den 24. Platz einnimmt, kann sich nur wundern, daß nicht schon bei der Anpflanzung der Harzer Fichten die Aussage Günther's [1] berücksichtigt wurde, wonach „unsere Fichte für Hüttenrauchgegenden der ungeeignetste Baum ist“. Dabei gab es bereits damals Vorschriften, die derartige Schäden im Prinzip nicht zuließen.

Nach § 16 der Reichsgewerbeordnung, erstmals erwähnt in der Gewerbeordnung des Norddeutschen Bundes vom 21. Juni 1869, die auf § 26 der Allgemeinen Gewerbeordnung für Preußen vom 17. 01. 1845 zurückgeht, gilt, daß: „... zur Errichtung von Anlagen, welche durch die örtliche Lage oder die Beschaffenheit der Betriebsstätte für die Besitzer oder Bewohner der benachbarten Grundstücke oder für das Publikum überhaupt, erhebliche Nachteile, Gefahren oder Belästigungen herbeiführen können, die Genehmigung erforderlich ist“.

Andererseits konnte nach § 906 des BGB vom 18. 08. 1896 „... der Eigentümer eines Grundstücks die Zuführung von Gasen, Dämpfen, Gerüchen, Rauch, Ruß, Wärme, Geräusch, Erschütterungen und ähnliche von einem anderen Grundstück ausgehende Einwirkungen insoweit nicht verbieten, wenn diese Einwirkung die Benutzung seines Grundstücks nicht, oder nur unwesentlich, beeinträchtigte“. Auch vor ca. 100 Jahren war demnach klar, daß die Technik einen gravierenden Einfluß auf die Umwelt haben kann.

Seitdem es Menschen auf dieser Erde gibt, hat es nicht enden wollende Auseinandersetzungen und Kämpfe mit der Natur gegeben. Der Wunsch zu überleben, sich gegen die vielfach zerstörerischen Kräfte der Natur zu schützen und diese sich zumindest in Teilen untertan zu machen, die Abhängigkeit vom Wetter zu verringern, Krankheiten heilen zu können, den Hunger zu stillen, sich zu Land, zu Wasser und in der Luft bewegen, oder schneller und sicherer ein beliebiges Ziel auf dieser Erde erreichen zu können, Energie in ausreichendem Umfang und in jederzeit verfügbarer und nutzbarer Form zur Verfügung zu haben, sowie viele andere Gründe waren es, die den Menschen dazu gebracht haben, den Versuch zu unternehmen, seine Umwelt in Teilbereichen nach seinen Wünschen zu formen. Er hat dabei über Jahrhunderte und Jahrtausende hinweg gelernt, die Natur besser zu verstehen, die physikalischen, chemischen und physikochemischen Grundlagen zu quantifizieren und diese Erkenntnisse auf die Entwicklung von Verfahren und Methoden in nahezu allen Bereichen des Lebens anzuwenden, um sich ein besseres Leben, weniger Krankheiten, mehr Freiheit von Hunger, Not und Furcht zu schaffen. Er hat es gelernt, etwas wider die Natur zu bewerkstelligen. So findet man in den aristotelischen „Mechanischen Problemen“: „In vielen Fällen nämlich wirkt die Natur dem Bedarf des Menschen entgegen; denn immer hat sie ihre eigene Weise. . . Soll daher etwas gegen die Natur bewerkstelligt werden, so bietet das wegen der Schwierigkeit eine Verlegenheit, und eine künstliche Behandlung ist erforderlich. Wir bezeichnen deshalb den Teil der Kunst, der aus solcher Verlegenheit heraushilft, als Mechanik. Der Dichter Antiphon sagte deshalb: Gewähre Kunst, den Sieg, den die Natur verwehrt.“ Im Jahre 1725 zählte der Leipziger Mechaniker, Maschinenbauer und Bergwerkskommissar Jakob Leupold [4] zu den Aufgaben des „Ingenieurs“: „Ingleichen mancherlei compendieuse Maschinen zu erfinden, die Arbeit zu erleichtern und was öfters unmöglich erscheine, dennoch möglich zu machen.“

Neben den Erfolgen im Kampf ums Überleben der Menschheit stehen aber auch Mißerfolge. So wächst heute die Erkenntnis, daß die Natur nur bis zu einem gewissen Grad Eingriffe toleriert und die Veränderung des Ökosystems Erde und der dort herrschenden Gleichgewichte nicht dazu führen dürfen, daß der Lebensraum des Menschen am Ende nicht erweitert, sondern eingeengt wird. Ob es allerdings bereits Allgemeinut ist, daß die Umweltgefährdung nicht weiter anwachsen darf, wenn der Mensch den Planeten Erde auch in Zukunft als seine Heimat behalten will, ist nicht sicher. In vielen Bereichen der Erde scheint jedoch die Notwendigkeit eines verstärkten Schutzes von Luft, Wasser und Boden vor Industrie, Verkehr und Haushalt erzeugten Schadstoffen noch rechtzeitig erkannt worden zu sein. Es wird der Aktivierung aller verfügbaren Kräfte in Wissenschaft und Industrie bedürfen, diese Herausforderung zu bestehen. Meines Erachtens wird der Ausgang dieses Wettlaufes aber auch in nicht unerheblichem Maße davon abhängen, inwieweit es gelingt, die Zahl der auf der Erde lebenden Menschen (Abb. 1) nicht in demselben Maße weiter anwachsen zu lassen, wie in diesem Jahrhundert.

Bei Aufrechterhaltung der derzeitigen Zuwachsrate ist zu befürchten, daß sich die Menschheit von irgendeinem Zeitpunkt an weder ausreichend ernähren kann, noch wird sich das Ökosystem Erde erhalten lassen. Das dargestellte Bevölkerungswachs-

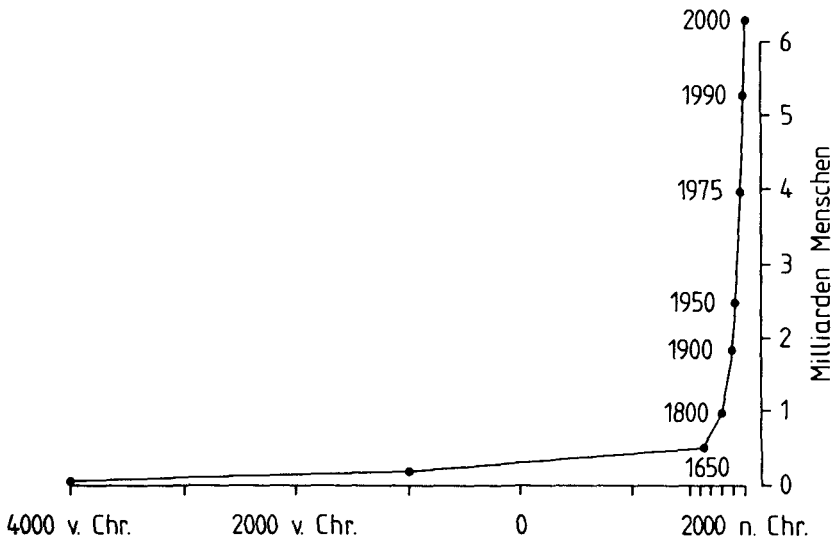


Abb. 1:  
Wachstum der Weltbevölkerung [5]

tum und die zumindest in Teilen der Weltbevölkerung stark angestiegenen Lebensansprüche führen nämlich über die Zunahme von Produktion und Konsum nicht nur zu einer starken Zunahme des Verbrauchs aller Ressourcen und, sofern uns eine Reduzierung der emittierten Schadstoffmengen nicht gelingt, auch zu einer Zunahme der Umweltbelastungen. Da weder die Rohstoffe dieser Erde zunehmen, noch die Umwelt Schadstoffe in beliebiger Menge aufnehmen, d. h. ohne Schaden zu nehmen absorbieren kann, wird die Umweltgefährdung weiter anwachsen. Vorhandene Ressourcen sollten deshalb langsamer abgebaut werden, und es sollten alle nur möglichen Anstrengungen gemacht werden, Schadstoffemissionen zu reduzieren.

Aus den Rohstoffen dieser Erde werden vor allem durch Verfahren und Methoden der Stoff- bzw. Energieumwandlung Produkte des menschlichen Bedarfs, d. h. Konsumgüter aller Art hergestellt. Vor einem Jahr hat R. Jeschar [6] ein neues Verfahren zur Energiewandlung und die dabei erzielten Ergebnisse, vor allem im Hinblick auf eine Reduzierung der Schadstoffemissionen, dargestellt. Ich möchte mich deshalb auf den Bereich der Verfahrenstechnik, d. h. der Stoffumwandlung durch physikalische und chemische Methoden, beschränken.

Bei den Verfahren der physikalischen und chemischen Stoffumwandlung (Abb. 2) werden aus natürlichen Rohstoffen Produkte des menschlichen Bedarfs hergestellt. Aus Gründen der Prozeßführung benötigen dabei fast alle verfahrenstechnischen Prozesse eine meist beachtliche Menge an Luft und Wasser. Im Verlauf des Prozesses kann das gewünschte Produkt z. B. in einem Gas- oder Flüssigkeitsstrom anfallen, aus dem das meist feste, partikelförmige Endprodukt abzuscheiden ist. Dieses Abscheiden aus

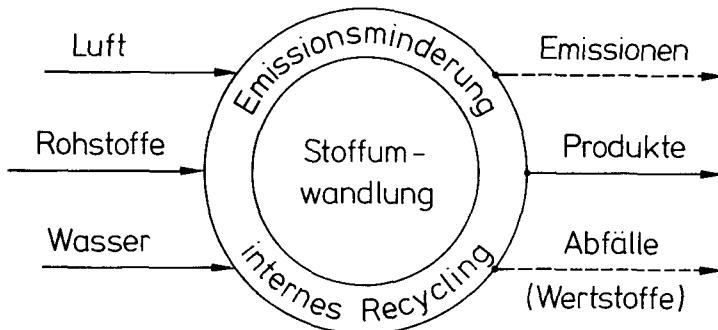


Abb. 2:

*Verfahren der physikalischen und chemischen Stoffumwandlung*

einem Gas- oder Flüssigkeitsstrom läßt sich im allgemeinen nicht in Form einer 100-prozentigen Phasentrennung durchführen, sondern es werden neben dem erwünschten Produkt Schadstoffe und evtl. Abfälle erzeugt, die teilweise in die Umgebung emittiert werden.

Die Maßnahmen zur Verminderung von Schadstoffemissionen und von Abfällen lassen sich in folgende Bereiche unterteilen:

1. Maßnahmen, den verfahrenstechnischen Prozeß so zu verändern, daß bei gleichem Endprodukt weniger bzw. keine Schadstoffe sowie Abfälle mehr nach außen abgegeben werden. Dies kann entweder durch eine andere Prozeßführung oder durch internes Recycling von Schadstoffen und Abfällen erzielt werden. Die Änderung des Prozesses beginnt bereits beim verwendeten Rohstoff. Sie setzt sich fort in der Verwendung von geringeren Luft- und Wassermengen, oder deren interner Rückführung. Eine weitere Aufgabe besteht darin, die verwendeten Prozesse so zu ändern, daß immer weniger Schadstoffe und Abfälle entstehen.
2. Die zur Abscheidung von molekular- bzw. grobdispersen Partikeln verwendeten Verfahren, Apparate und Maschinen sind weiter zu verbessern, bzw. diese sind unter Bedingungen zu betreiben, die eine bessere Abscheidung der Schadstoffe gewährleisten.
3. Weiterhin sind die bei der Produkterzeugung anfallenden Abfälle so gering wie möglich zu halten. Bei der Erzeugung von Konsumgütern kann dieses Problem in vielen Fällen durch internes Recycling gelöst werden. Die Minderung von Schadstoffemissionen kann jedoch auch von der Erzeugung eines Abfallstoffes begleitet werden, der zwar natürlich vorkommende Rohstoffe ersetzen kann und deshalb eigentlich ein Wertstoff ist, der aber meist infolge von Verunreinigungen nur einen geringeren Wert als das Naturprodukt aufweist.

In nahezu allen angesprochenen Stufen sind noch Zukunftsaufgaben zu lösen, so daß sich die heutige Generation keinesfalls auf ihren Lorbeeren oder denen ihrer Vorgänger ausruhen kann. Die Verbesserung bestehender Verfahren, Methoden, Appa-

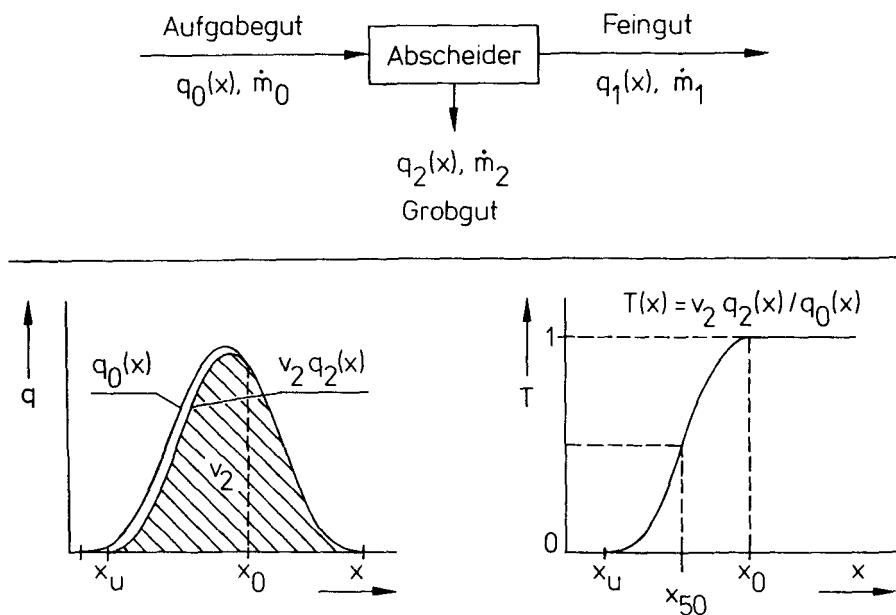


Abb. 3:

*Schematische Darstellung eines Abscheiders und der zugehörigen Trennung*

rate und Maschinen und die Entwicklung und Anwendung neuer Verfahren wird eine Zukunftsaufgabe bleiben.

In der Folge möchte ich mich auf das Abscheiden grobdisperser flüssiger bzw. fester Partikel aus Gasen beschränken. Bei den dafür verwendeten Abscheidern fällt das gewünschte Produkt als Pulver an. Jede unvollkommene Abscheidung bedeutet einen Wertstoffverlust in Form einer Emission in die Abluft.

Bevor ich zu einer Erläuterung der Grundprinzipien der Feststoffabscheidung aus Gasen komme, möchte ich das angestrebte Ziel noch etwas genauer definieren.

In Abb. 3 ist in der oberen Hälfte schematisch ein Abscheider dargestellt, dem ein Aufgabegut mit dem Massenstrom,  $\dot{m}_0$ , und der darunter dargestellten Verteilungsdichtekurve,  $q_0(x)$ , zugeführt wird. Im Abscheider fällt das Grobgut mit dem Massenstrom,  $\dot{m}_2$ , und der Partikelgrößenverteilung,  $q_2(x)$ , an. Die Trennung ist im allgemeinen unvollkommen, so daß feine Partikel, im Gasstrom dispergiert, den Abscheider passieren können und in die Umgebungsluft emittiert werden.

Die Trennung ist in der unteren Bildhälfte dargestellt. Die schraffierte Fläche unter der Grobgut-Verteilungsdichtekurve stellt den Gesamtabscheidegrad,  $v_2$ , dar, den man aus dem Verhältnis  $\dot{m}_2/\dot{m}_0$  berechnet.

Auf der rechten Seite ist die sogenannte Trennkurve oder Fraktionsentstaubungsgradkurve,  $T(x)$ , angegeben. Sie kennzeichnet die Trennung bzw. die Abscheidung. Jeder Punkt der Kurve gibt an, zu welchem Anteil eine bestimmte Partikelgröße abge-

schieden wurde, d. h. ins Grobgut gelangte. Der Medianwert ist die sogenannte Trenngrenze.

Das Ziel jeder Abscheidung besteht darin, eine vollständige Phasentrennung durchzuführen, d. h. möglichst wenig Partikel mit dem Gas zu emittieren, und damit den Gesamtabseidegrad,  $v_2$ , möglichst zu Eins zu machen. Dies bedeutet, daß der verwendete Abscheider nicht nur eine möglichst niedrige Trennkorngröße aufweisen muß, sondern daß die Trennkurve,  $T(x)$ , möglichst steil verlaufen sollte.

Bei der Abscheidung fester oder flüssiger Partikel aus Gasen unterscheidet man im wesentlichen folgende Grundprinzipien:

- a) die Querstromtrennung in einer geraden oder umgelenkten Strömung,
- b) die Querstromtrennung an frei beweglichen Kugeln (Tropfen) und feststehenden Zylindern (Fasern) bzw. Scheiben,
- c) die Gegenstromtrennung im Schwere- oder Zentrifugalfeld,
- d) die Trennung an einer für das Gas durchlässigen porösen Wand (Filtration).

Ich möchte mich im folgenden auf die drei erstgenannten Bereiche beschränken und die verwendeten Abscheideprinzipien kurz erläutern. Darüber hinaus soll gezeigt werden, daß mit diesen Abscheidern einerseits eine vollständige Phasentrennung nicht möglich ist, d. h. daß immer ein kleiner Rest meist extrem feiner Partikel den Abscheider als Emission verläßt, und andererseits eine Emissionsminderung immer mit größeren Investitionskosten, d. h. größeren Anlagen, und mit zum Teil überproportional, im Hinblick auf die angestrebte Wirkung, ansteigenden Energiekosten verbunden ist. Besserer Umweltschutz ist deshalb direkt mit der Bereitstellung billiger Energie verknüpft.

In Abb. 4 ist das Prinzip der Querstromabscheidung in einem ebenen geraden Kanal dargestellt, der luminar durchströmt wird.

Der Abscheider besteht dabei z. B. aus einem Rohr rechteckigen oder kreisförmigen Querschnitts, durch den von links nach rechts das Aerosol mit der Geschwindigkeit,  $v$ , strömt. Der Einfachheit halber soll auf die Berücksichtigung des Einflusses eines Strömungsprofils bzw. der Ausbildung desselben verzichtet werden. Die Partikel

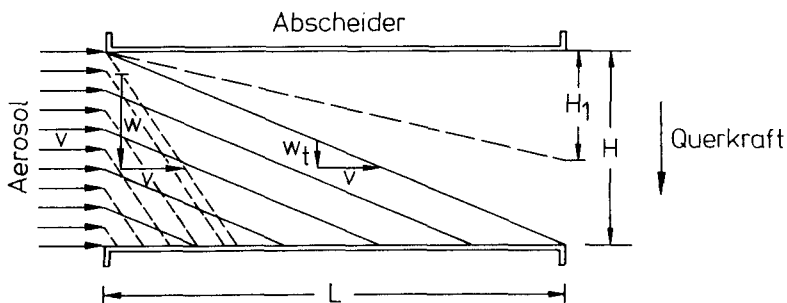


Abb. 4:  
Prinzip der Querstromabscheidung



sind beim Eintritt in den Abscheider gleichmäßig über dem Kanalquerschnitt verteilt. Unter Annahme laminarer Partikelumströmung bewegen sich die Partikel unter der Wirkung von noch zu erläuternden Querkraften im Kanal auf geradlinigen Bahnkurven, deren Steigung durch die Strömungsgeschwindigkeit,  $v$ , und die Partikelgeschwindigkeit,  $w$ , senkrecht dazu bestimmt wird. Nimmt man an, daß die herrschende Querkraft die Schwerkraft ist, so sedimentieren die abzuscheidenden Partikel mit ihrer stationären Sinkgeschwindigkeit,  $w_g$ :

$$w_g = \frac{(\rho_p - \rho_f) g x^2}{18 \eta} \quad (1)$$

in der sich nach rechts fortbewegenden Strömung, in der sie mit der Strömungsgeschwindigkeit,  $v$ , transportiert werden. Die sogenannte Trenngrenze des Abscheiders wird durch diejenige Partikel bestimmt, die, an der Oberkante des Kanals eintretend, gerade noch an der rechten unteren Kante abgeschieden wird. Die Steigung dieser Bahnkurve ist  $w_t/v$ . Aus der Abbildung ist leicht zu ersehen, daß theoretisch alle Partikel mit  $w > w_t$  vollständig, alle Partikel mit  $w < w_t$  nur zum Teil abgeschieden werden. Die Trennkurve läßt sich aus:

$$T(w) = H_t/H = L w/(Hv) \quad (2)$$

berechnen. Will man im Abscheider möglichst viele Partikel zurückhalten, so muß dessen Trenngrenze herabgesetzt werden. Dies läßt sich dadurch erreichen, daß man entweder die Gasgeschwindigkeit,  $v$ , verringert, was sich bei vorgegebenem Volumenstrom,  $\dot{V}$ , in großen Kanalquerschnitten äußert, oder indem man große Kanallängen,  $L$ , bzw. kleine Kanalhöhen,  $H$ , verwendet. Eine vollständige Abscheidung ist nur dann möglich, wenn extrem kleine Partikel fehlen.

Der Boden des Kanals dient als Abscheidefläche. Bei nach diesem Prinzip ausgebildeten Meßgeräten genügt es, am Boden eine Haftfolie anzubringen, um die Partikel abzuscheiden. Bei technischen Abscheidern muß entweder die Wand für den Feststoff durchlässig sein, oder aber der Feststoff bewegt sich auf dieser in Richtung auf einen Auslaß.

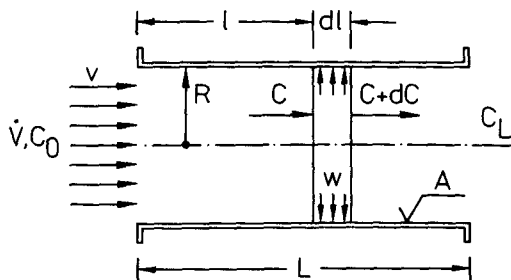


Abb. 5:  
Massenbilanz in der turbulenten Strömung eines Elektrofilters

In Abb. 4 wurde angenommen, daß die Partikelbewegung in einem laminar strömenden Gas mit Kolbenprofil auf determinierten Bahnkurven erfolgt. Tatsächlich liegt jedoch bei vielen Querstromabscheidern, z. B. bei Elektrofiltern, eine stark turbulente Strömung vor, die die Partikelbewegung beeinflusst. Nimmt man, wie in Abb. 5 dargestellt, an, daß mit Ausnahme einer Schicht in der Nähe der Abscheidefläche, A, in der die Partikel der Größe,  $x$ , sich mit der Geschwindigkeit,  $w$ , zur Wand bewegen, und ansonsten im Abscheider vollkommene Durchmischung herrscht, so erhält man für den Verlauf der Feststoffkonzentration mit der Rohrlänge,  $C_L$ , und den Trenngrad,  $T$ , einen exponentiell abnehmenden Verlauf. Auch hier ist eine vollständige Abscheidung nicht möglich. Führt man die Abscheidefläche, A, und den Luftvolumenstrom,  $\dot{V}$ , ein, so erhält man die in Gl. 3 angegebene Beziehung:

$$T(x) = 1 - C_L/C_o = 1 - \exp(-Aw/\dot{V}). \quad (3)$$

$A/\dot{V}$  wird oft die spezifische Niederschlags- oder Abscheidefläche genannt.  $w$  ist die Wanderungsgeschwindigkeit unter Wirkung der Querkraft. Sie stellt eine Austauschgröße dar, die den Stoffübergang zur Abscheidefläche beschreibt. Vielfach wird, z. B. bei Elektrofiltern,  $w$  als Anpassungsgröße zwischen Theorie und Praxis verwendet.

Die auf dem Markt befindlichen Abscheider unterscheiden sich vor allem in der Art der angewendeten Querkraft. Neben der Schwerkraft werden die Fliehkraft, die elektrische Kraft und Diffusionskräfte ausgenutzt. Die Verwendung von Diffusionskräften, wie sie z. B. bei der Verwendung eines Temperaturgefälles und der Ausnutzung der Thermophorese auftreten, sind jedoch nur dann für die Abscheidung einsetzbar, wenn die systematische Partikelbewegung in Richtung auf die Abscheidefläche dominiert und diese die überlagerte, stochastische Partikelbewegung überdeckt.

Bei laminarer Partikelumströmung erhält man für die Querbewegung unter Schwerkrafteinwirkung die stationäre Sinkgeschwindigkeit,  $w_g$  (Gl. 1). Schwerkraft-Querstromanordnungen sind jedoch in Form von Absetzkammern nur für relativ grobe Partikel, etwa oberhalb 100  $\mu\text{m}$ , einsetzbar. Wird die Fliehkraft als Querkraft eingesetzt, d. h. der Kanal in Rotation versetzt, so lassen sich je nach der gewählten Beschleunigung,  $a$ , gegenüber der Schwerkraft um das Beschleunigungsverhältnis,  $a/g$ , höhere Sinkgeschwindigkeiten,  $w_a$ , erzielen:

$$w_a = w_g \frac{a}{g}. \quad (4)$$

Dementsprechend läßt sich entweder die Kanallänge,  $L$ , verkürzen, oder aber die Strömungsgeschwindigkeit,  $v$ , erhöhen, d. h. der Abscheider kleiner bauen.

Eine technisch insbesondere für sehr kleine Partikel und große Luftvolumenströme interessante Querkraft ist die elektrische Kraft. Die Wanderungsgeschwindigkeit,  $w_e$ , der Partikel im elektrischen Feld der Stärke,  $E$ , hängt vor allem von der Partikelladung,  $q$ , der Partikelgröße,  $x$ , und der sogenannten Cunningham-Korrektur,  $C_u$ , ab:

$$w_e = \frac{q E_0}{3 \pi \eta x} C_u. \quad (5)$$

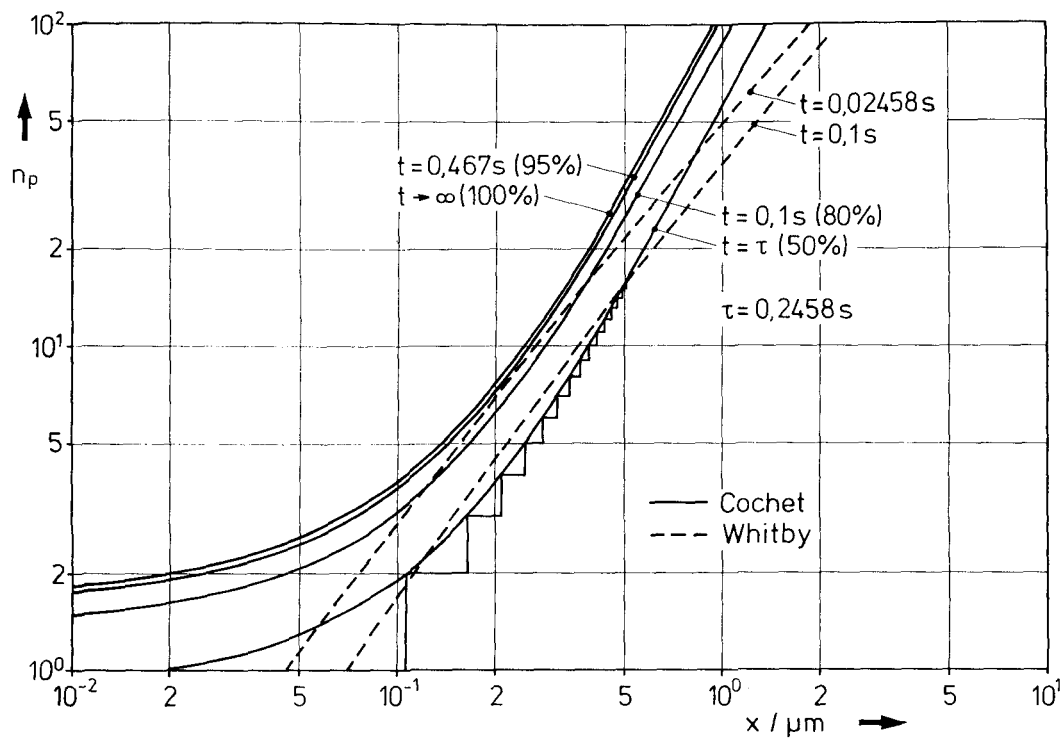


Abb. 6:  
Abhängigkeit der Zahl der Elementarladungen,  $n$ , von der Partikelgröße,  $x$ , nach R. Cochet [7]  
und K. T. Whitby [8]

$$Cu = 1 + A \frac{\bar{\lambda}}{x}. \quad (6)$$

Dabei ist die mittlere freie Weglänge,  $\bar{\lambda}$ , nach Gl.7 berechenbar:

$$\bar{\lambda} = \frac{k T}{\pi \sqrt{2} d_M^2 p}. \quad (7)$$

Die z. B. in einer Corona-Strecke aufgebraachte Ladung,  $q$ , die der Zahl,  $n$ , der Elementarladungen,  $e$ , entspricht, ist in der von R. Cochet [7] vorgeschlagenen Form für die überlagerte Feld- und Diffusionsaufladung in Gl.8 angegeben:

$$q = n e = \pi \epsilon_0 E_1 x^2 \frac{t}{t + \tau} \left[ \left( 1 + \frac{2\bar{\lambda}}{x} \right)^2 + \frac{2(x_p - 1)}{1 + 2\bar{\lambda}/x (x_p + 2)} \right]. \quad (8)$$

Man entnimmt dieser Gleichung, daß die Partikelladung in erster Näherung der Partikeloberfläche,  $S = \pi x^2$ , proportional ist. An Gl.8 kann man aus der mittleren freien Weglänge,  $\bar{\lambda}$ , erkennen, daß die thermische Energie der Ionen die Wanderungsgeschwindigkeit,  $w_e$ , maßgebend beeinflusst. Der Verlauf der Anzahl der Partikelladungen ist für zwei unterschiedliche Aufladetheorien in Abb.6 dargestellt.

Prinzipiell lassen sich Querstromabscheider dieser Art auch bei Kombination der genannten Querkräfte bauen. So ist fast immer die Schwerkraft an der Abscheidung beteiligt. Sie wird insbesondere für den Abtransport des abgeschiedenen Feststoffes genutzt.

In Abb.7 ist das Prinzip der Querstromabscheidung in einer umgelenkten Kanalströmung dargestellt.

Die äußere Fläche ist die Abscheidefläche, an die die bereits genannten Anforderungen zu stellen sind. Eine Partikel, am Innenradius,  $R_i$ , zugeführt, wird durch Zentri-

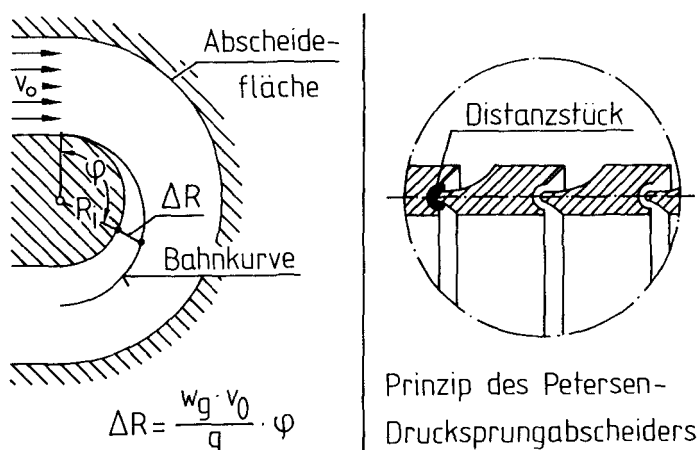


Abb.7:  
Querstromabscheider, umgelenkte Strömung

fugalkräfte auf größere Radien in Richtung auf die Abscheidefläche hin abgedrängt. Für Potentialströmung und laminare Partikelumströmung erhält man für den radialen Weg,  $\Delta R$ , den eine Partikel nach Transport im Kanal um den Winkel,  $\varphi$ , zurücklegt:

$$\Delta R = \frac{w_g v_0}{g} \varphi. \quad (9)$$

Danach ist in erster Näherung für eine Partikel der Größe,  $x$ , das Produkt aus  $x^2 v_0$  konstant zu halten, wenn eine bestimmte Radialbewegung aufrecht erhalten werden soll. Eine Reduzierung der Trennkorngröße um den Faktor 10 erfordert eine Erhöhung der Gasgeschwindigkeit um den Faktor 100, was eine entsprechende Steigerung des Energieverbrauchs des Abscheiders zur Folge hat. Geometrie und Betriebsbedingungen sind deshalb immer so zu wählen, daß von vornherein bereits beim Bau die gewünschten Trenngrenzen anvisiert werden.

Das dargestellte Prinzip ist sowohl für die Abscheidung, als auch für die Windsichtung zu verwenden. Dann ist jedoch das zu sichtende Aerosol in der Nähe der Kanalinnenwand in eine sonst partikelfreie Strömung einzubringen.

Eine wirkungsvolle Anwendung im Petersen-Drucksprungsabscheider [9] ist auf der rechten Seite der Abb. 6 dargestellt. Die in den gekrümmten Kanälen abgeschiedenen Feststoffpartikel mit Partikelgrößen  $< 0,5 \mu\text{m}$  werden intermittierend durch eine geringe Menge Waschflüssigkeit herausgespült. Der Abscheider wird jedoch vor allem für die Abscheidung von Flüssigkeitstropfen, die als Film ablaufen, eingesetzt. Für die Entfernung feiner Tröpfchen aus Gasen werden sonst vor allem Lamellenabscheider [9] verwendet, deren Grundprinzip in der Hintereinander- und Parallelschaltung von umgelenkten Strömungen in Form eines Zick-Zack-Kanals besteht. Einige Beispiele sind in Abb. 8 dargestellt [9]. Die an der jeweiligen Außenwand abgeschiedenen Tropfen bilden einen Flüssigkeitsfilm, der sich in einer Tasche fängt und dort senkrecht zur Strömungsrichtung des Gases abläuft. Durch Parallelschalten dieser Kanäle lassen sich auch große Gasvolumenströme reinigen.

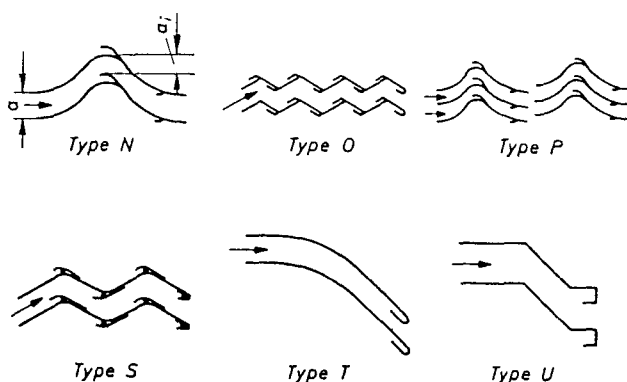


Abb. 8:

Unterschiedliche Kanalformen von Lamellenabscheidern nach H. Brauer und Y. B. G. Varma [9]

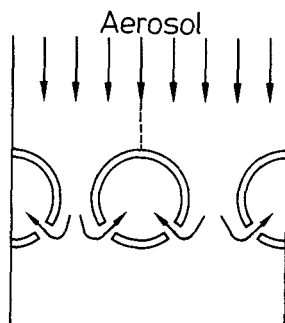


Abb. 9:

Rohrbündelabscheider nach K. Hermes und K. Leschonski [10]

Um zu zeigen, daß die vorhandenen Möglichkeiten, neue Abscheider zu entwickeln, noch nicht erschöpft sind, möchte ich einen von uns für Hochtemperatur- und Hochdruckprozesse entwickelten einfachen Abscheider vorstellen (Abb. 9) [10, 11].

Er besteht aus einem rechteckigen Kanal, in dem Rohre mit Abstand nebeneinander angeordnet sind. Die Rohre weisen auf der Rückseite Schlitzte auf. Führt man dieser Anordnung einen Aerosolstrom zu und saugt einen Teilstrom des Gases durch die rückseitigen Schlitzte ab, so läßt sich eine Trennung durchführen. Feinste Partikel werden vom abgesaugten Gas mitgenommen, während grobe Partikel der Umströmung nicht folgen können. Während eine Rohrreihe einen guten Windsichter abgibt, lassen sich durch mehrere, hintereinander angeordnete Rohrreihen auch hohe, wenigstens mit einem Zyklonabscheider vergleichbare Gesamtabseidegrade erreichen.

Partikelabscheidung läßt sich jedoch auch bei der Umströmung von kugelförmigen, zylindrigen oder scheibenförmigen Objekten erreichen.

Aufgrund ihrer Massenträgheit können die Feststoffpartikel/Tropfen den gekrümmten Stromlinien nicht folgen. Sie treffen auf dem Hindernis auf und werden dort, sofern sie auf der Oberfläche haften bleiben, abgeschieden. Der Trenngrad,  $\varphi$ , setzt sich des-

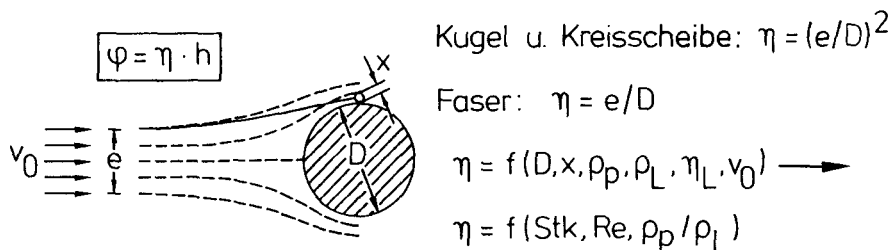


Abb. 10:

Partikelabscheidung bei der Umströmung von Kugeln bzw. Zylindern

halb aus dem Produkt einer Auftreffwahrscheinlichkeit,  $\eta$ , und einer Haftwahrscheinlichkeit,  $h$ , zusammen:

$$\varphi = \eta h. \quad (10)$$

Für die reine Trägheitsabscheidung läßt sich die Auftreffwahrscheinlichkeit bei Kenntnis des Strömungsfeldes um das Hindernis für Partikel einer bestimmten Sinkgeschwindigkeit,  $w_g$ , vorausberechnen. Es läßt sich eine Abhängigkeit von drei dimensionslosen Kennzahlen, der Stokes-Zahl,  $Stk$ , der Reynoldszahl,  $Re$ , und dem Dichteverhältnis,  $\varrho_p/\varrho_L$ , angeben:

$$\eta = f(D, x, \varrho_p, \varrho_L, \eta_L, v_0) = f(Stk, Re, \varrho_p/\varrho_L). \quad (11)$$

Die meist rechnerisch ermittelten Zusammenhänge lassen sich in Form von Trennkurven,  $\eta = f(Stk)$ , für alle drei genannten Fälle darstellen (Abb. 11) [12]. Problematisch gestalten sich diese Berechnungen vor allem deshalb, weil, z.B. für den Fall des umströmten Zylinders, im technisch interessanten Bereich der Reynoldszahlen, zwischen  $0,1 < Re < 100$ , keine geschlossenen Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen zur Verfügung stehen. Dementsprechend unterscheiden sich die von unterschiedlichen Autoren berechneten Trennkurven, wie in Abb. 11 dargestellt. F. Löffler und W. Muhr [12] haben der Abscheidung an Fasern, insbesondere den zusätzlichen, von mir nicht

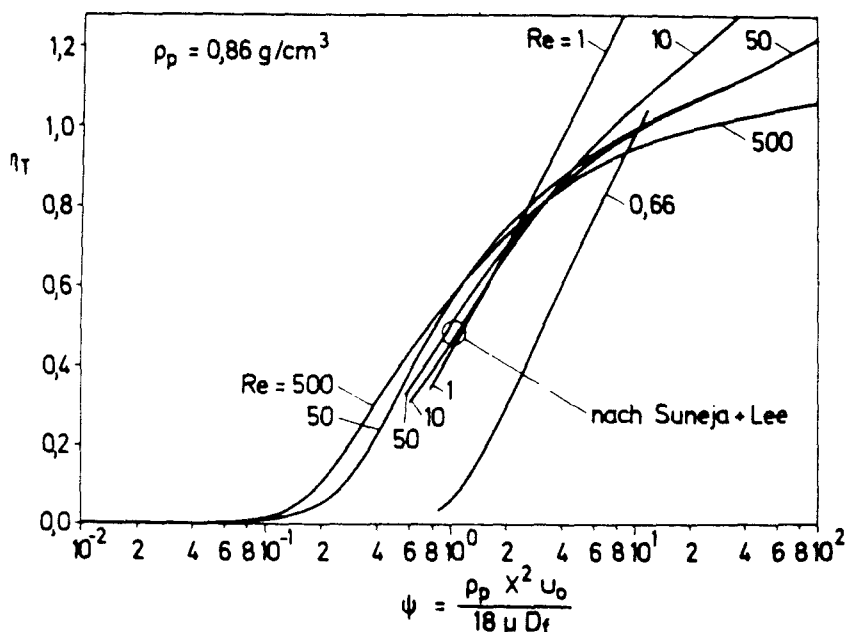


Abb. 11:  
Trennkurven bei der Umströmung von Kugeln bzw. Zylindern [12]

genannten Einfluß elektrischer und diffusiver Kräfte sowie die Haftung von Partikeln eingehend untersucht. Die meist für Klimaanlage oder im Bereich der Reinraumtechnik angewendeten Speicherfilter sind lockere Fasergebilde, bei denen nur wenige Prozent des Filtervolumens von Fasern eingenommen werden. Der Hohlraumvolumenanteil,  $\varepsilon$ , liegt deshalb oberhalb  $\varepsilon = 0,9$ , meist sogar oberhalb von  $\varepsilon = 0,99$ . Der Abscheidegrad derartiger Filter läßt sich wiederum durch eine Exponentialfunktion darstellen, d.h. eine vollständige Reinigung des das Filter passierenden Gases ist nicht möglich. Mit dem Abscheidegrad der Einzelfaser,  $\varphi(x)$ , dem Hohlraumvolumenanteil,  $\varepsilon$ , und dem Verhältnis von Faserprojektionsfläche zu Filterfläche,  $f$ , erhält man:

$$T(x) = 1 \sim \exp\left(-\frac{f}{\varepsilon} \varphi(x)\right). \quad (12)$$

Für Vorfilter nimmt  $f$  Werte zwischen 3 und 10, für HochleistungsfILTER zwischen 100 und 300 an. HochleistungsfILTER werden deshalb aus sehr dünnen Fasern mit großer Gesamtlänge,  $L^*$ , hergestellt. Während eine Filterfaser solange einer staubbeladenen Strömung ausgesetzt werden kann, bis ihre Oberfläche mit Staub gesättigt ist, kann ein frei beweglicher Tropfen auf seiner Flugbahn durch den Abscheideraum eines Naßwäschers nur solange, wie er vom Gas umströmt wird, Feststoffpartikel abscheiden. Er muß eine Relativbewegung zum Umgebungsmedium ausführen.

Bei bekanntem Tropfenabscheidegrad,  $\eta(x)$ , und bekannter Bahnkurve, gekennzeichnet durch den Verlauf der Relativgeschwindigkeit, läßt sich z.B. das auf das Tropfenvolumen bezogene, von einem Tropfen gereinigte Gasvolumen,  $m$ , berechnen:

$$m = \frac{3}{2D} \int_0^{s_{\text{rel}}^*} \eta(s_{\text{rel}}) ds_{\text{rel}} = \frac{3}{2D} \int_0^{t^*} \eta(t) v_{\text{rel}}(t) dt. \quad (13)$$

Der Verlauf von  $m$  ist in Abb. 12 für einen Modell-Querstromabscheider von uns [13] berechnet worden. Man erkennt, daß relativ kleine Tropfengrößen für eine optimale Abscheidung erforderlich sind. Auch hier ist es möglich, den Abscheidegrad für eine bestimmte Partikelgröße zu berechnen. Er hängt nicht nur von  $m$ , sondern auch von der Tropfengrößenverteilung,  $q_3^*(D)$ , und dem Verhältnis Volumenstrom Wasser,  $\dot{V}_1$ , zu Volumenstrom Luft,  $\dot{V}_g$ , ab:

$$T(x) = 1 \sim \exp\left(-\frac{V_1}{V_g} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} m(x, D) q_3^*(D) dD\right). \quad (14)$$

Auch hier erhält man den bereits bekannten exponentiellen Zusammenhang. Auch der Gesamtabseidegrad,  $T_{\text{ges}}$ , läßt sich für eine vorgegebene Partikelgrößenverteilung berechnen:

$$T_{\text{ges}} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} T(x) q_3(x) dx. \quad (15)$$



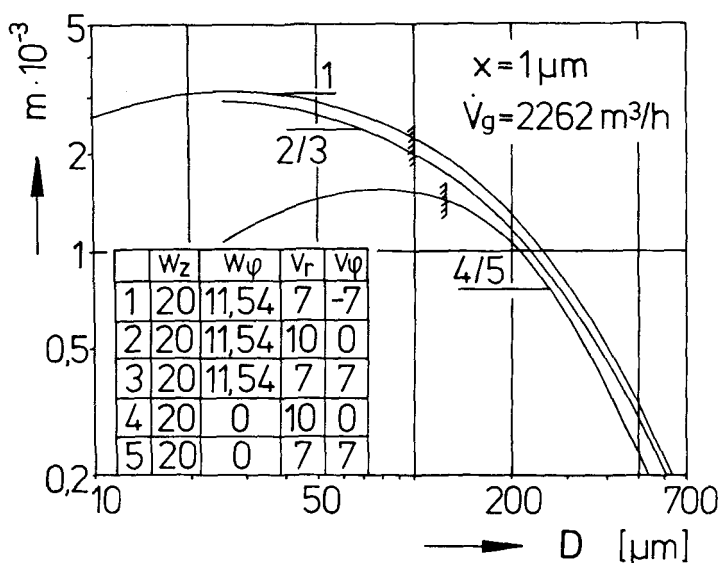


Abb. 12:

Spezifisches gereinigtes Gasvolumen in Abhängigkeit vom Tropfendurchmesser [13]

Ergebnisse für eine Partikelgrößenverteilung zwischen  $1\text{ }\mu\text{m}$  und  $3\text{ }\mu\text{m}$  sind in Abb. 13 in Abhängigkeit vom spezifischen Wasserverbrauch  $\dot{V}_l/\dot{V}_g$  aufgetragen. Man erkennt, daß sich die Abscheidung durch verstärkte Wasserzugabe verbessert. Weiterhin wurde festgestellt, daß umso weniger Wasser benötigt wird, je kleiner die Tropfengrößenverteilung gewählt wurde. Naßabscheider mit Abgasreinigung durch ein Kollektiv sind ein Paradebeispiel dafür, daß saubere Luft durch eine andere Verschmutzung, hier die von Wasser, erkaufte wird. Der Luftreinigung muß sich deshalb eine meist nicht weniger aufwendige Wasserreinigung anschließen.

Bei dem dritten von mir genannten Grundprinzip der Partikelabscheidung wird meist eine Gegenstromtrennung im Zentrifugalfeld verwendet. Der bekannteste Vertreter dieser Gerätegruppe ist der Zyklonabscheider, der schematisch in Abb. 14 dargestellt ist. Es gibt wohl kaum einen anderen Abscheider, mit dem sich mehr Forschergenerationen in Hochschule und Industrie beschäftigt haben. Man sollte deshalb annehmen, daß seine Vorausberechnung mit einer hohen Genauigkeit möglich wäre. Dies ist jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen richtig. Das tangential am oberen Ende unterhalb des Deckels zugeführte Aerosol löst im Zyklon eine komplizierte, dreidimensionale Strömung aus, deren Verlauf zwar für den Fall der reinen Gasströmung angenähert bekannt ist, deren Veränderung durch Impulsaustausch mit dem Feststoff bei höheren Gutbeladungen uns jedoch immer noch zu schaffen macht. Die von W. Barth [14], E.M. Muschelknautz, W.K. Krambrock [15] und anderen aufgestellten Theorien erlauben jedoch eine für technische Anwendungen ausreichende Dimensionierung. Die tatsächliche, unter Betriebsbedingungen erreichte Abscheidung, gekenn-

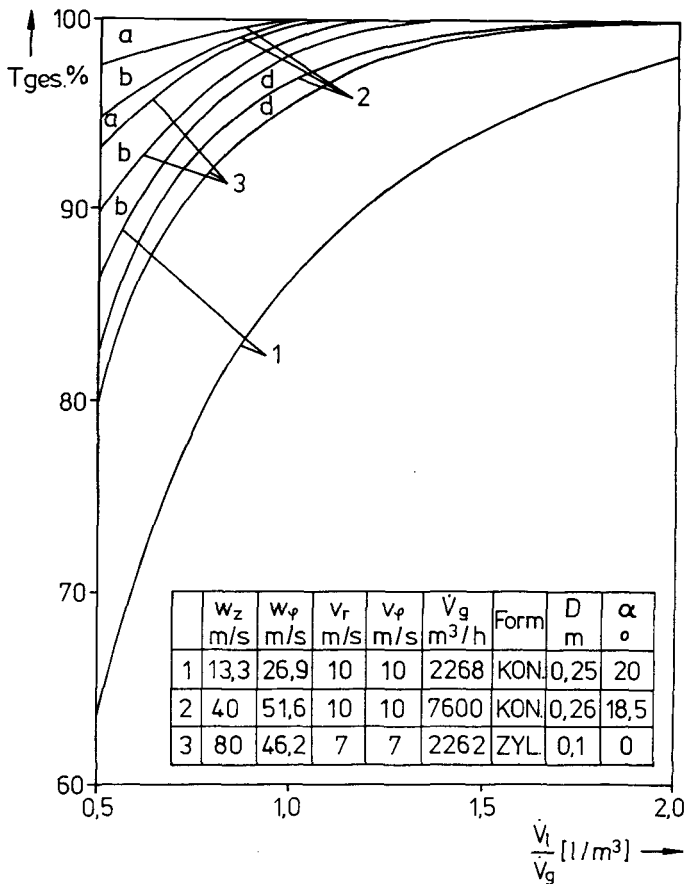


Abb. 13:

Gesamtabscheidegrad für eine Partikelgrößenverteilung von 1 bis 3  $\mu\text{m}$   
in Abhängigkeit vom spezifischen Wasserverbrauch [13]

zeichnet durch Trennkurve, Trenngrenze und Trennschärfe, sollte man jedoch vor allem in Gewährleistungsfällen nochmals experimentell überprüfen.

Die Trenngrenze eines Zyklonabscheiders berechnet man wie die Trenngrenzen eines Spiralwindsichters (Abb. 15). Man erhält sie aus dem radialen Gleichgewicht zwischen Fliehkraft und Widerstandskraft. Es resultiert die einfache angegebene Beziehung, wonach die Sinkgeschwindigkeit der Partikel im Fliehkraftfeld gleich der radialen Geschwindigkeitskomponente der Strömung ist:

$$w_{\text{at}} = v_r \quad (16)$$

Im Zyklonabscheider wird angenommen, daß diese Beziehung sich auf die unterhalb des Tauchrohres sich erstreckende Abströmfläche vom Radius,  $r_i$ , und der Höhe,  $h_i$ ,

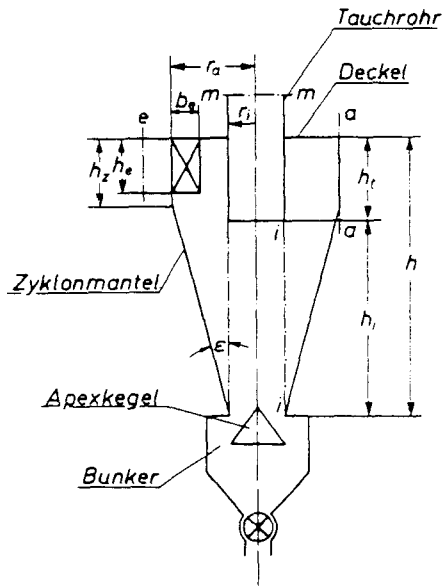


Abb. 14:  
Zyklonabscheider

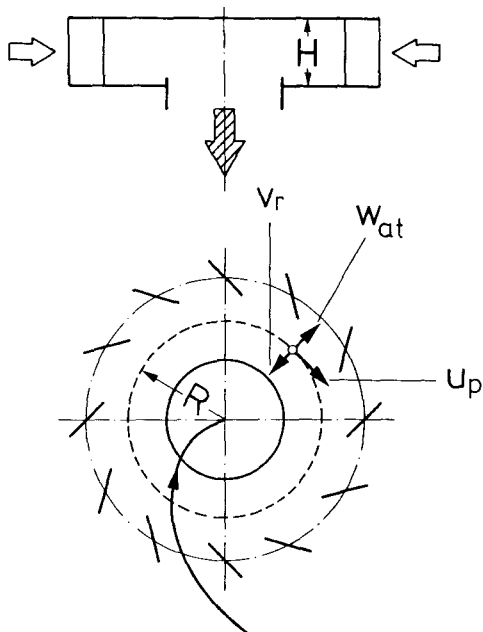
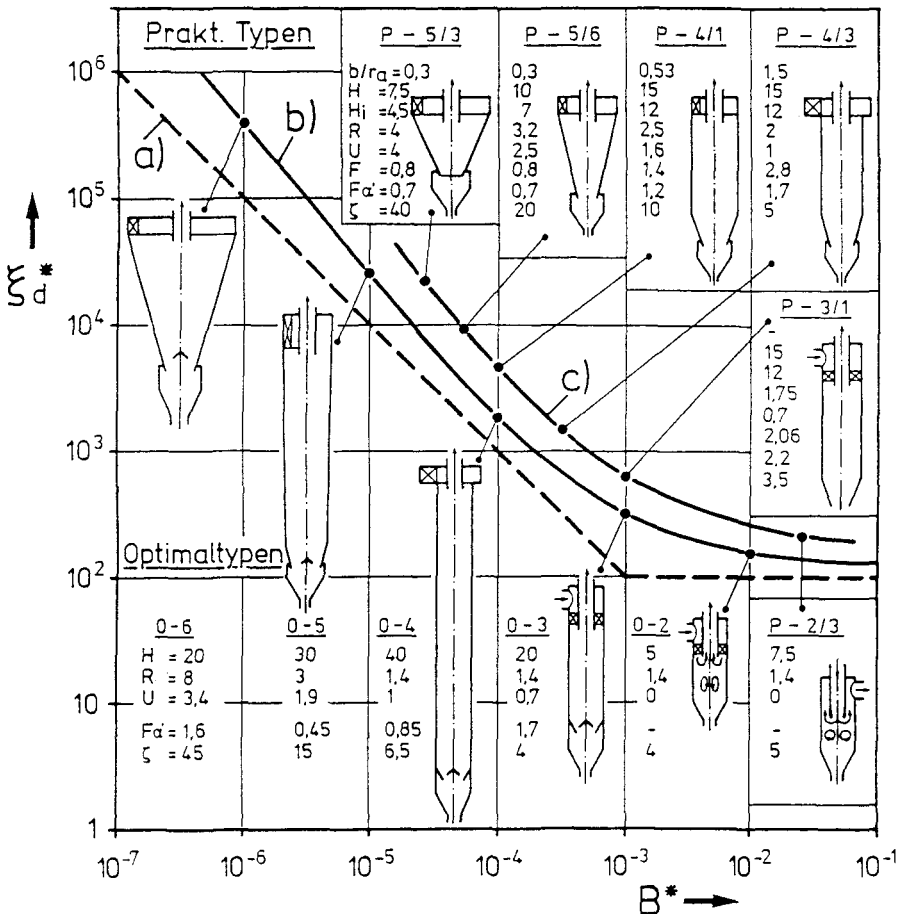


Abb. 15:  
Schematische Darstellung eines Spiralwindsichters

anwenden läßt. Vorausgesetzt wird dabei, daß sich sowohl die radiale als auch die Umfangskomponente der Strömung über der Höhe,  $h_i$ , nicht ändern.

Größere Partikel als nach der obigen Beziehung berechnet wandern zum Zyklonmantel, werden auf dessen Innenseite gesammelt und gelangen meist in Form von wendelartig verlaufenden Strähnen zum Grobgutbunker. Feinere Partikel als die Trenngrenze verlassen mit der Luft den Zyklonabscheider durch das Tauchrohr.

Die Drallströmungen im Innern des Zyklonabscheiders und des Tauchrohrs sowie der Strömungseinlauf erzeugen einen Druckverlust, der meist durch ein dem Zyklon



- a) Grenzkurven nach Barth und Leineweber  
 b) Optimalkurve  
 c) Kurve für praxisgerechte Zyklontypen

Abb. 16:

Auslegungsdigramm für Zyklonabscheider nach Muschelknautz und Krambrock [15]

nachgeschalteten Gebläse zu überwinden ist. E. Muschelknautz und W. Krambrock [15] haben ein Auslegungsdiagramm (Abb. 16) für Zyklonabscheider vorgeschlagen, in dem ein dimensionsloser Druckverlust,  $\xi_d$  bzw.  $\xi_d^*$  (eine Eulersche Kennzahl), über einer dimensionslosen Trennkorngröße,  $B$  bzw.  $B^*$  (eine Stokes-Kennzahl), aufgetragen wird. Da  $\xi_d^* \sim \Delta p$  und  $B^* \sim x_t^2$ , erkennt man unschwer aus dieser Abbildung, daß kleinere Trenngrenzen unverhältnismäßig mehr Gebläseleistung erfordern. Bei einer näheren Betrachtung zeigt sich auch, daß sich eine Veränderung der Trenngrenze eines ausgeführten Zyklonabscheiders nur in engen Grenzen durch Änderung des Gesamtvolumenstroms,  $\dot{V}$ , erreichen läßt. Die Trennkorngröße nimmt nämlich umgekehrt proportional zur Wurzel aus  $\dot{V}$  ab, während die Gebläseleistung mit der dritten Potenz von  $\dot{V}$  zunimmt.

Dieses Beispiel verdeutlicht wohl am anschaulichsten die eingangs aufgestellte Behauptung, daß die Reduzierung des Ausstoßes an grobdispersen/flüssigen oder festen Partikeln direkt mit der Zurverfügungstellung von billiger Energie verknüpft ist. Auch hier gilt, was ich eingangs sagte, daß wir etwas wider die Natur bewerkstelligen müssen, wenn wir zum Schutz der Umwelt, von Mensch, Tier und Natur, Schadstoffemissionen verringern wollen.

Ich hoffe, daß es mir gelungen ist, Ihnen im Rahmen des vorgegebenen Themas einen Einblick in einen Teilbereich der Mechanischen Verfahrenstechnik zu geben. Meine ursprüngliche Absicht, Sie ausführlicher über eigene, umweltrelevante Forschungsarbeiten zu unterrichten, habe ich im Rahmen dieses Vortrags nicht durchführen können. Neben den bereits genannten Naßabscheideruntersuchungen und der Entwicklung des Rohrbündelabscheiders, haben wir uns im Bereich der Luftreinigung vor allem mit der Anwendung von Strömungen in gekrümmten Kanälen, der automatischen on-line Probennahme aus Aerosolen und der Messung von Partikelgrößenverteilungen mit optischen Zählverfahren und Laserbeugungsspektrometern befaßt.

### Formelzeichen

$A$ = Abscheidefläche, Konstante	$m$ = gereinigtes Gasvolumen bezogen auf Tropfenvolumen
$a$ = Beschleunigung	$p$ = Druck
$C$ = Feststoffkonzentration	$q$ = Partikelladung
$C_u$ = Cunningham Korrektur	$q_3$ = Volumen-Dichteverteilung
$D$ = Durchmesser von Kugeln (Tropfen), Scheiben, Fasern	$R$ = Radius
$d_M$ = Molekulardurchmesser	$Re$ = Reynoldszahl
$E_0$ = Feldstärke der Trennzone	$S$ = Oberfläche
$E_1$ = Feldstärke der Aufladzone	$Stk$ = Stokes-Zahl
$e$ = Elementarladung	$s$ = Weg
$f$ = Faserprojektionsfläche zu Filterfläche	$T$ = Trenngrad
$g$ = Erdbeschleunigung	$T_{ges}$ = Gesamtabscheidegrad
$H$ = Höhe	$t$ = Zeit
$h$ = Haftwahrscheinlichkeit	$u$ = Anzahl der Elementarladungen
$L$ = Länge	$\dot{V}$ = Luftvolumenstrom

$v$ = Strömungsgeschwindigkeit	$\epsilon$ = Hohlraumvolumenanteil
$v_0$ = Anfangsgeschwindigkeit	$\epsilon_0$ = Dielektrizitätskonstante
$w$ = Partikelgeschwindigkeit	$\eta$ = Auftreffwahrscheinlichkeit, Viskosität
$w_a$ = Sinkgeschwindigkeit im Fliehkraftfeld	$\chi_p$ = Materialkonstante
$w_e$ = Wanderungsgeschwindigkeit im elektrischen Feld	$\lambda$ = mittlere freie Weglänge
$w_s$ = Sinkgeschwindigkeit im Schwerfeld	$\varrho_n$ = Flüssigkeitsdichte
$x$ = Partikelgröße, Äquivalentdurchmesser	$\varrho_L$ = Luftdichte
	$\varrho_p$ = Partikeldichte
	$\tau$ = Halbwertszeit
	$\varphi$ = Winkel, Trenngrad von Einzelpartikeln und Einzelfasern

### Literatur

- [1] F. Günther: Der Harz in Geschichts-, Kultur- und Landschaftsbildern. Verlag Carl Meyer, Hannover (1888). Neudruck: Dr. Martin Sändig, Wiesbaden (1971).
- [2] K. Schnabel: Unter grünen Tannen des Oberharzes. Verlag Georg Nauck, Berlin (1907).
- [3] J. V. Schröder, C. Reuß: Die Beschädigung der Vegetation durch Rauch und die Oberharzer Hüttenrauchschäden. Verlag Parcy, Berlin (1883).
- [4] J. Leupold: Theatrum Machinarium, Leipzig (1725).
- [5] Council on Environmental Quality, USA: The Global 2000 Report to the President. Verlag Zweitausendeins, Frankfurt 1980, 143–189.
- [6] R. Jeschar, N. Schopf: BWG-Bericht. Jahrbuch 1985 der BWG, 35–55.
- [7] R. Cochet: Colloques Intern. Centre Nat. Recherche Scientific (Paris) 102 (1961), 331–338.
- [8] K. T. Whitby: Electrical Measurement of Aerosols, in: B. Y. H. Liu: Fine Particles, Aerosol Generation, Measurement, Sampling and Analysis. Academic Press 1976, 581–624.
- [9] H. Brauer, Y. B. G. Varma: Air Pollution Control Equipment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1981).
- [10] K. Hermes, K. Leschonski: Theoretische und experimentelle Untersuchung eines einstufigen Umlenkabscheiders für grobe Partikel. Chem.-Ing.-Tech. 55 (1983), 47–48.
- [11] K. Hermes: Abscheidung grober Feststoffpartikel durch Umlenktrennung und rückseitiges Absaugen an querangeströmten Profilen unter Berücksichtigung der Verhältnisse bei der Kohlevergasung. Dissertation, TU Clausthal (1982).
- [12] F. Löffler, W. Muhr: Die Abscheidung von Feststoffteilchen und Tropfen an Kreiszylindern infolge von Trägheitskräften. Chem.-Ing.-Tech. 44 (1972), 510–514.
- [13] K. Leschonski, S. de Silva: Modelltheorie eines Querstromabscheiders. Synopse in Chem.-Ing.-Tech. 50 (1978), 556–557, Langfassung 15 Seiten, 9 Abb., 2 Tab., Fotokopie und Mikrofilme MS 608/79.
- [14] W. Barth: Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern auf Grund neuer Untersuchungen. Brennstoff, Wärme, Kraft 8 (1956), 1–9.
- [15] E. Muschelknautz, W. Krambrock: Aerodynamische Beiwerte des Zyklonabscheiders aufgrund neuer und verbesserter Messungen. Chem.-Ing.-Tech. 42 (1970), 247–255.